卒業論文

アルカリ原子蒸気のスピン状態操作による巨視的な物体の回転運動制御

東京農工大学　物理システム工学科
畠山研究室
学籍番号:11256016
黒田 崇浩

指導教官:畠山 温

指導教官	事務

目次

第 1 章　序論 5
1.1　研究背景と目的 5
1.2　研究成果 6
1.3　本論文の構成 6

第 2 章　実験装置および原理 7
2.1　実験の全体像 7
2.2　回転原理 9
2.3　アルカリ原子封入セル 10
2.3.1　クエンチングガス 10
2.3.2　ルビジウム蒸気 11
2.3.3　吸収スペクトル 11
2.4　位置検出器 13
2.4.1　位置検出器 (PSD) 13
2.4.2　PSD の分解能 14
2.5　ねじり振り子 16
2.5.1　弾性体のねじれ 16
2.5.2　ねじれ振動 17
2.5.3　ワイヤーとセルの接続方法 19
2.6　その他使用装置 20
2.6.1　回転導入 20
2.6.2　偏極磁場用コイル 20
2.6.3　ヒーター 21
2.6.4　CCD カメラ 21

第 3 章　実験 22
3.1　回転の観測 22
3.1.1　観測方法 22
3.1.2　排除すべき回転運動 22
3.1.3　回転の方向、大きさ 22

第 4 章　考察 24

第 5 章　まとめと展望 26

5.1　本論文のまとめ 26

5.2　今後の展望 26

参考文献 28

第 1 章

序論

1.1 研究背景と目的

20 世紀初頭に現れ、今日も発展を続ける量子力学は、原子・分子などの微視的（ミクロ）な運動を記述する。量子力学を近似的に扱ったものが古典力学であるが、我々の日常において目に見えておこる物体の運動などは古典力学で十分説明がいく。それゆえ大抵の場合、量子力学はミクロな現象に対して、古典力学はマクロな現象に対して用いるといったように切り離されて考えられる。だが、マクロなスケールの運動でも量子力学的な考え方をしなければ説明がつかないような現象はいくつかの研究から報告されている。そして、このような量子論と古典論の境界領域である研究は世界的に盛んに行われるようになってきている。

ここでそのような研究の中でも本研究において深く関係のあるスピンを取り扱った歴史的に有名な 2 つの研究について触れておく。これら 2 つの実験は電子スピンや光子スピンという量子力学的な物理量を外部から変化させ、角運動量保存則に従いマクロな物体を回転させる実験である。まず Einstein - de Haas 効果 [1] として有名であるが、1915 年にワイヤーで吊られた静止した磁性体に外部から磁場を与えるとその磁性体が回転することが提案された。これは磁性体の構成原子のスピンの向きが変化することによるものである。続いて、1936 年に行われた Beth の実験 [2] である。スピンの向きがそろっている円偏光が 1/2 波長板 (マクロな物体) を通過し逆回り円偏光になる際におきる光のスピン角運動量の変化によってマクロな物体が回転することが実証された。

Einstein - de Haas 効果ではマクロな物体を構成している原子そのもののスピンを操作し、角運動量の移行を確認した。それに対して本研究では、まず光子のスピン角運動量をセルによって封入されたアルカリ気体原子に移す。この原子が原子同士や原子を封入しているセル壁面と衝突を繰り返すことによって、最終的にセルの角運動量へ移行することを観測する。この観測から光子のスピン角運動量を原子スピンへ移したあと、どのように容器 (セル) の回転運動となるかというメカニズムを解明していく。これによって原子の状態操作を用いた巨視的な物体のナノスケールでの制御への応用も期待できる。今日では光を用いて原子の内部状態を操作することが可能となっている。そこで本研究では光を用いた原子の量子 (スピン) 状態の操作により、原子のスピン角運動量変化がセルの回転運動につながっていることを定量的に示すことを目的とする。

具体的な実験系としては、光偏極しやすいアルカリ金属 (ルビジウム) 蒸気を封じた円筒形のガラスセ

ルが操作する対象である。アルカリ原子を円偏光レーザーで偏極し、偏極された原子のスピン緩和がセル表面で起こることによってセルが回転することを測定する。セルは細いワイヤーでつり下げる。微小な回転は回転観測ミラーにプローブ光を入射し、回転による反射光の位置変化を読み取り測定する。光から原子に移行する角運動量は理論的に厳密に見積もることができるので、原子スピンからセルへの角運動量移行が定量的に評価できる。

1.2　研究成果

光の照射によるセルの回転を観測したが、著者が狙っていた、原子とセルを相互作用させ、スピン角運動量を古典的角運動量に変換させることによる回転を確認するには至らなかった。しかし、実験を通して著者が想定していなかったセルが回転する原因やその影響について探ることができた。

1.3　本論文の構成

本論文は 4 章構成となっていて、第 2 章ではまず実験の全体像を説明し、その後に原理と合わせて使用した実験装置の詳細を記している。ここでは使用した装置類、例えば本研究において重要となるねじり振り子、位置検出器 (PSD) などに関して詳しく説明している。第 3 章には実験の内容と結果について記述し、第 4 章で考察をしている。そして結果、考察をまとめ、今後の展望を述べる。

第 2 章

実験装置および原理

本章ではまず実験についての全体像を示して、その詳細について説明していく。順序としては本研究の原理部分を示し、使用したルビジウム蒸気セルに触れながら用いた装置の説明する。その後、本実験に必要な回転を測定するための位置検出器 (Position Sensitive Detector, PSD)、ねじり振り子の作製、その他の装置について記述していく。

2.1 実験の全体像

はじめに実験システムの概略図を図 2.1 に示す。本実験の根幹を成すのは、ルビジウム蒸気が封入してある円筒型のセルをおもりとして吊り下げたねじり振り子である。このセルに下から円偏光 (ポンプ光: Rb D_2 線、波長: 780 nm) を入射してセルが回転する。その回転をセルとワイヤーの間にある回転観測ミラーによって反射されるプローブ光の位置変化によって観測するというのが実験の簡略な流れである。図 2.2 は回転を測定するための装置の配置図である。振り子が入れてある容器の形状からレーザーポインタと振り子に接着してあるミラー、PSD のなす角はおおまかに $\pi/4$ rad となるように設置する。ミラー (振り子) が $d\Phi(\ll 1)$ だけ回転したとすれば、PSD とミラーの距離を r として PSD 受光面において輝点は $2rd\Phi$ だけ移動する。よって r を大きくすることで回転を検出しやすくすることができる。装置が設置してある除振台の大きさから最大で $r = 1$ m 程度までであった。PSD の位置分解能が最大で 0.2 μm であることから回転を観測するには $d\Phi \geq 1 \times 10^{-7}$ rad の回転が必要となる。

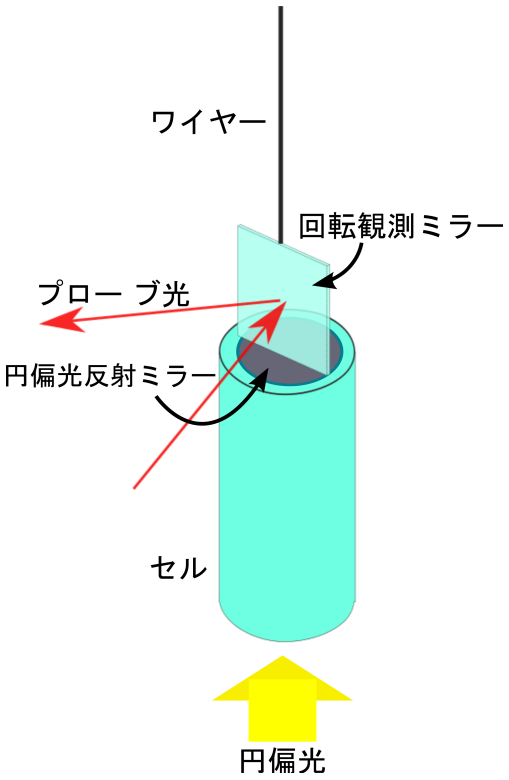

図 2.1　ねじり振り子概略図

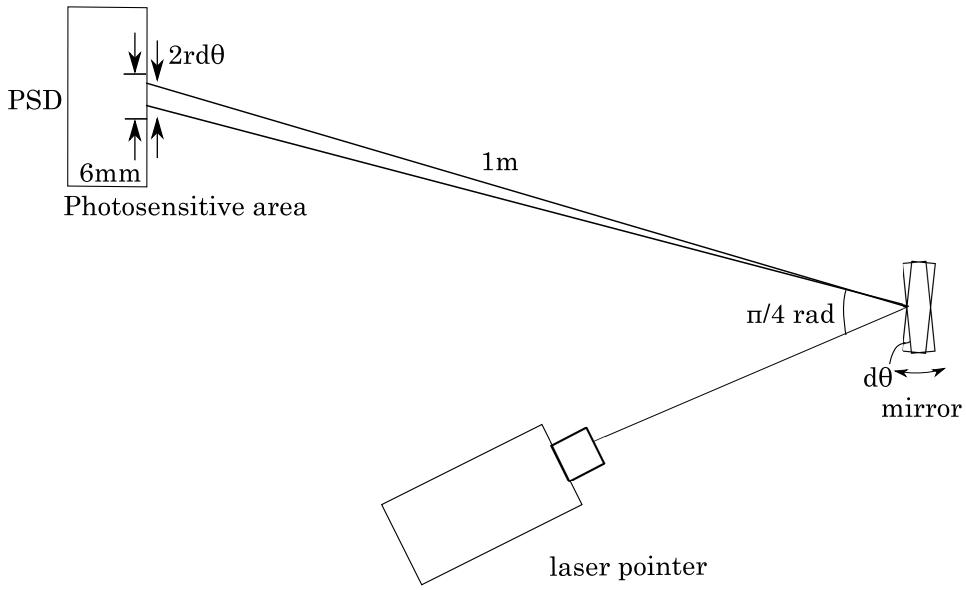

図 2.2　ミラーの回転と輝点の変位

続いて装置の全体像を図 2.3 に示す。装置は縦に長く、右図は左図の装置の上部である。実験を行う上で、観測するねじれ振動はわずかであることが予想され、他の振動を排除するために装置は除振台の上に設置した。また必要に応じて真空に排気できるように振り子は真空チェンバー内に入れた。既に述べたようにセルに対して下からポンプ光、横からプローブ光を入れるので真空チェンバーには必要な箇所にビューポートを取り付けた。

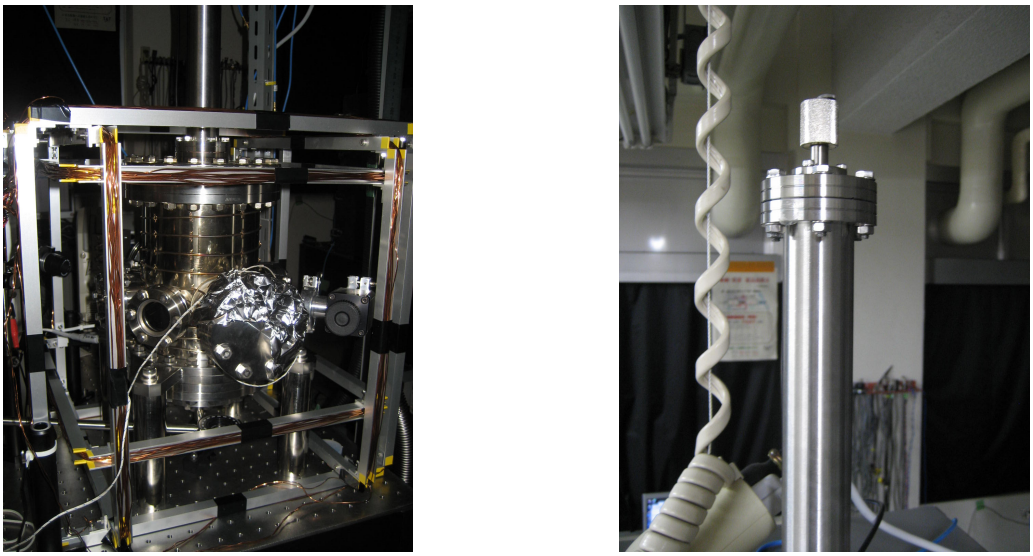

図 2.3　実験装置

2.2　回転原理

光ポンピングと呼ばれる技術によって、ルビジウム原子のスピン角運動量変化を操作する。実験に使用する D_2 線によるルビジウム原子の光学遷移に触れながらこの技術について示す。図 2.4 は基底状態 $(5s^2S_{1/2})$ と励起状態 $(5p^2P3/2)$ の 2 つの準位がそれぞれ $m_j = \pm 1/2$ と $m_j = \pm 1/2, \pm 3/2$ に分裂している 6 準位系を表している。また照射光は σ^+ 偏光を想定している。

原子の光学遷移には選択則がある。原子に共鳴である光 (ポンプ光) を照射すると励起される。ポンプ光として $\sigma^+(\sigma^-)$ 偏光を原子に照射したときの遷移は、磁気量子数 m_j の変化が $\Delta m_j = +1(-1)$ の遷移しかおこらない。このとき原子は光子を吸収して励起されるだけでなく、光子のもつ角運動量も吸収する。σ^+ 偏光を照射したとき、ルビジウム原子では基底状態の $m_j = -1/2, +1/2$ からそれぞれ励起状態の $m_j = +1/2, +3/2$ へ遷移する。ルビジウム原子のスピンは $\hbar$ だけ変化し、$\hbar$ を単位としたときの全角運動量は $J = 1/2$ から $J = 3/2$ となる。だが、脱励起するとき選択則は $\Delta m_j = \pm 1, 0$ である。したがって、ルビジウム原子が脱励起するときに放出される光によって、得られた角運動量の一部が失われてしまう。そこでルビジウム原子を光を放出せずに脱励起 (無輻射緩和) させることができる窒素 (クエンチング) ガスをセル内に封入する。

以上の実験システムによって得られる角運動量について具体的に見積もっていく。フォトン 1 つは $E = \hbar\omega$ のエネルギーをもち、原子に吸収されると $\Delta m_j = \pm 1$ だけ変化し、原子スピン角運動量は $\pm\hbar$ だけ変化する。ポンプ光のパワーを W とすれば、これから単位時間に照射される光子数は $N = W/\hbar\omega$ となるので、原子が単位時間あたりに受け取る角運動量 (トルク) の大きさは $N\hbar$ である。使用レーザーのパワー、波長をそれぞれ 1 W, 780 nm としてこの照射光のすべての光子を吸収した場合、得られるトルクの大きさは $\tau = 4.1 \times 10^{-16}$ N·m である。この角運動量を得たルビジウム原子が原子同士や窒素分子、セル表面などと衝突を繰り返し、相互作用することで最終的にセルの回転に至るはずである。また、セルの回転する方向は照射する円偏光の回る向きによって変わるはずである。これは原子のスピン角運動量変化の向きが σ^+ 偏光か σ^- 偏光かで反転するからである。

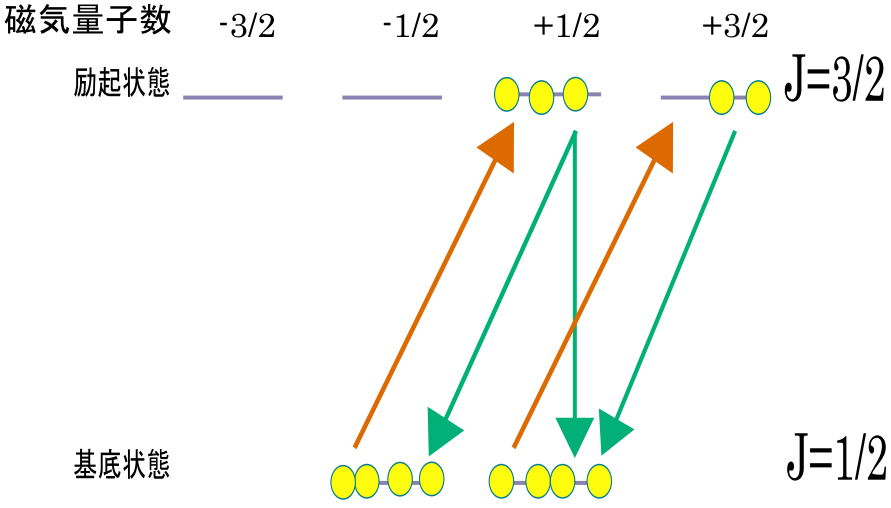

図 2.4　Rb の D_2 線遷移 (σ^+ 偏光)

2.3 アルカリ原子封入セル

ルビジウム原子はアルカリ原子であり、希ガスに電子が 1 つ付加された単純な構造である。回転原理で説明したように光によって原子のスピン状態を操作することができる。本実験では原子とセルの相互作用に焦点を当てていて、スピン角運動量の変化はポンプ光による原子の内部状態操作によって与えられるものである。そこで効率よくポンプ光を吸収できるようにセル内のルビジウムの原子数密度、クエンチングガスである窒素の圧力について見積もっていく。

2.3.1 クエンチングガス

先に少し述べたが、クエンチングガスを封入することによってルビジウム原子を無輻射緩和させることができる。本来、励起されたルビジウム原子は一定時間経過すると、光を放出して基底状態に落ちる。だが、励起状態にあるルビジウム原子が 2 原子分子である窒素分子と衝突することによって、窒素分子が振動励起され、ルビジウム原子が光を放出せずに基底状態に脱励起する。このときルビジウム原子の励起状態のエネルギーと角運動量が窒素分子に少なくとも一部は移行する。これによってルビジウム原子が脱励起するとき、光の放出という形で得られた角運動量が失われることを防ぐ。ここでは具体的に必要な窒素の数密度 n_{N_2} について示していく。ルビジウムの励起寿命が $\tau = 30$ ns であるので [3]、それよりも短い時間でルビジウム原子に衝突すればよい。このことから式 (2.1) を得る。

$$n_{N_2} v_{N_2-Rb} \sigma_{N_2,Rb} \geq \frac{1}{\tau} \tag{2.1}$$

ここで、σ: quenching cross sections, $\sigma_{N_2,Rb} = 43$ Å^2 である [4] 。また窒素分子とルビジウム原子の相対速度は以下のようになる。

$$v_{N_2-Rb} = \sqrt{v_{N_2}^2 + v_{Rb}^2} = \sqrt{\frac{8k_BT}{\pi}(\frac{1}{m_{N_2}} + \frac{1}{m_{Rb}})} \simeq 32\sqrt{T\ [\mathrm{K}]}\ [\mathrm{m/s}] \tag{2.2}$$

式 (2.1)(2.2) より

$$n_{N_2} \geq \frac{1}{\tau}\sigma v_{N_2-Rb} = 2.4 \times 10^{18} \frac{1}{\sqrt{T\ [\mathrm{K}]}}\ [\mathrm{cm}^{-3}] \tag{2.3}$$

となる。窒素の数密度 n_{N_2} は、式 (2.2),(2.3) から室温 ($T = 300$ K) とした場合、式 (2.3) から $v_{N_2-Rb} = 554$ m/s、$n_{N_2} = 1.4 \times 10^{17}$ cm^{-3} となる。理想気体の状態方程式にあてはめて、このときの窒素の圧力はおおまかに

$$p = n_{N_2} k_B T \simeq 1.4 \times 10^{23} \times 1.4 \times 10^{-23} \times 300 = 4.4\ \mathrm{Torr} \tag{2.4}$$

となる。ただし、ボルツマン定数 $k_B \simeq 1.4 \times 10^{-23}$ J/K である。

2.3.2 ルビジウム蒸気

次にルビジウムの数密度について具体的に計算していく。ルビジウムの数密度は窒素の圧力を基に見積もっていく。ここである強度をもったエネルギー流中でのエネルギーの吸収の大きさを表す光吸収断面積 $\sigma_0(\nu)$ の関係式は以下で表される [5], [6]。

$$\int \sigma_0(\nu)d\nu = \pi r_0 cf \simeq 1.8 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s} \tag{2.5}$$

ただし、古典電子半径 $r_0 = 2.82 \times 10^{-13}$ cm、光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s、振動子強度 $f = 0.67$ (D_2 線) である。光吸収断面積はローレンツ関数であり、定数 A をもちいて以下のように表すことができる。

$$\sigma_0 = \frac{A}{\Gamma^2 + (\nu_0 - \nu)^2} \tag{2.6}$$

$$\int \sigma_0(\nu)d\nu = \sigma_0(\nu_0)\Gamma\pi = \frac{A}{\Gamma}\pi \tag{2.7}$$

また半値半幅は

$$\Gamma = 9.5\ \mathrm{MHz/Torr} \tag{2.8}$$

であることがわかっている [7]。よって式 (2.4) から $\Gamma = 9.5 \times 4.4 = 42$ MHz となる。さらに式 (2.5), (2.7) から $\sigma_0(\nu) = 1.4 \times 10^{-14}\ \mathrm{m^2}$ と求められる。ここで透過光のパワー I は以下のように表される。

$$I = I_0 \exp(-\sigma_0 l n_{Rb}) \tag{2.9}$$

ただし l は光の進行方向に対しての気体を封入しているセルの長さである。セルは軽量であることが求められ、$l = 30$ mm とした。式 (2.9) から透過光が十分小さくなるように見積もっていく。$n_{Rb} = 7.4 \times 10^9\ \mathrm{cm^{-3}}$ であれば、$\frac{I}{I_0} = 0.045$ となりセル内部で十分に光を吸収できることになる。ルビジウム原子の供給量はセルの温度を調整することによって変えることができる。2.3.3 節で示すが、使用したセルがポンプ光を十分吸収するには温度を上げる必要があった。

2.3.3 吸収スペクトル

上記の見積もりはルビジウムの励起寿命でルビジウム原子と窒素分子の衝突がおこる場合を考えている。無輻射緩和を十分起こすためにはこれより十分短い時間で衝突する必要があり窒素の圧力をあげなくてはならない。そこでドップラー広がりより大きくならない 50 Torr 程度に窒素の圧力を上げた。

使用するセルにパワーが 25 μW の D_2 線を入射し、フォトダイオードで透過光の吸収スペクトルを観測した。室温と温度を上げたときの吸収スペクトルを図 2.6, 2.5 に示す。横軸は周波数、縦軸は透過光をフォトダイオードで検出した電気信号である。図 2.5 は図中央の赤線が実際に得られた吸収スペクトルを表し、図下方のピークによってフィッティングした曲線を青線で表す。緑色のベースラインはレーザーのパワーの時間変化を考慮したものである。図上方には得られた曲線とフィッティング曲線からのずれを示す。また図下方のそれぞれのピークの注釈はその基底準位から励起状態へ遷移していることを表してい

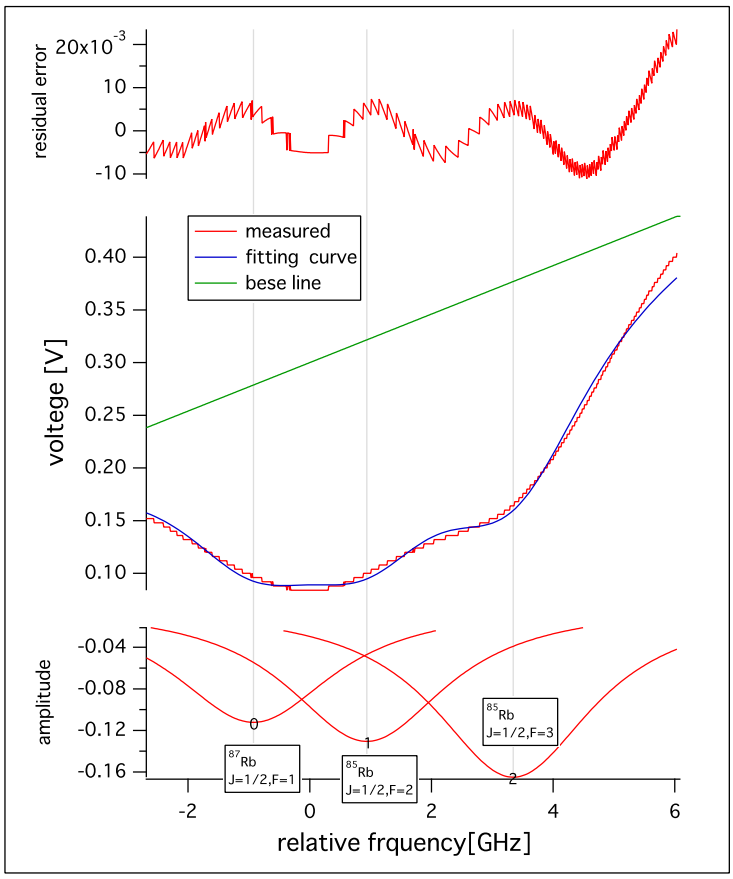

図 2.5　温度を上げたとき

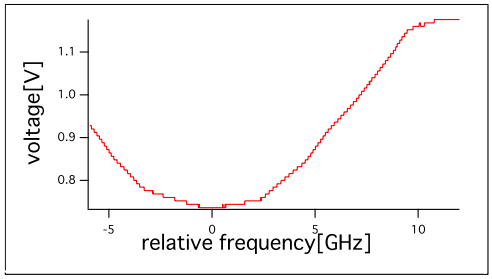

図 2.6　室温

吸収スペクトル

る。窒素の圧力が予想よりも大きく、ピークが広がっていた。そのため、それぞれのピークの重なりが大きくなったのでフィッティングの不確かさも大きい。ピークの半値全幅はドップラー広がりと圧力広がりを考慮した。ドップラー広がりは以下のように表され、圧力によらず温度の平方根に比例する。

$$2|\nu - \nu_0| = \frac{2\nu_0}{c}\sqrt{\frac{2k_B T \ln 2}{m}} \tag{2.10}$$

ただし ν_0 は共鳴周波数、c は光速、m は原子 1 個の質量である。正確な窒素の圧力を見積もることはできないが、温度を上げたとき $T \simeq 320$ K とし、ルビジウムの原子量を 85.46 とすればドップラー広がりは $2|\nu - \nu_0| \simeq 540$ MHz となった。ここから圧力広がりも求められ 3 GHz となった。式 (2.8) よりセル内の窒素の圧力は ~ 150 Torr となり、少なくとも 50 Torr 以上はあることがわかった。

図 2.6 では $J = 1/2,\ F = 3$ からの遷移吸収スペクトルは埋もれてしまっていて、温度を上げたときに見られたピークは見られなかった。また室温においては完全には無輻射緩和だけにならず、透過光が確認された。このことから室温では光の吸収は十分にはおきていないことが言える。ドライヤーで温めたので温度はわからないが、温度を上げたことによって吸収が多くなり透過光は完全になくすことができた。これは温度を上げたときの方が室温のときより電気信号が小さくなっていることからもわかる。

2.4 位置検出器

2.4.1 位置検出器 (PSD)

マイクロメートルオーダーの変化を観測するために高感度な位置検出器 (Position Sensitive Detector, PSD) を作製した。使用した PSD の動作原理について以下に示す。PSD の基本的な構造は PIN フォトダイオードと同様である。PSD の特徴は P 層が受光面と抵抗層を兼ねた P 型抵抗層となっていて、その両端に 1 対の出力電極が形成されているということである。PSD にスポット光が入射すると、入射位置には光量に比例した電荷が発生する。この電荷は光電流として抵抗層を流れそれぞれの電極までの距離に逆比例して分割され、出力電極 X_1, X_2 から取り出される。PSD 受光面 (長さ: $L_X = 6$ mm) の中心を原点とした場合の輝点の入射位置 X_A と出力電極の電流 I_{X_1}, I_{X_2} の関係は以下のようになる [8]。

$$I_{X_1} = \frac{\frac{L_X}{2} - X_A}{L_X} I_0 \tag{2.11}$$

$$I_{X_2} = \frac{\frac{L_X}{2} + X_A}{L_X} I_0 \tag{2.12}$$

$$\frac{I_{X_2} - I_{X_1}}{I_{X_1} + I_{X_2}} = \frac{2X_A}{L_X} \tag{2.13}$$

$$X_A = \frac{L_X}{2} \frac{I_{X_2} - I_{X_1}}{I_{X_1} + I_{X_2}} \tag{2.14}$$

実際の実験に用いた回路は出力電流を電圧変換している。回路図と使用部品を以下に示す。実験の性質上出力信号の変化が微小であることが予想された。広帯域、高速な信号を検出するわけではなかったので、できる限りノイズを抑えるように注意しオペアンプなどを選定した。

使用部品

- 1 次元 PSD S3931 (浜松ホトニクス社)
  - 有効受光面長 L_X: 6 mm
  - 受光感度 : 約 0.5 A/W (780 nm)
- オペアンプ OPA124PB (TEXAS INSTRUMENTS 社)
  - 入力バイアス電流: ±0.35 pA
  - 入力オフセット電流: ±0.25 pA
- 積層セラミックコンデンサー 47 pF
- 積層セラミックコンデンサー 0.1 μF
- 1 MΩ 抵抗器
- 両面スルホール・ガラス・ユニバーサル基板　C タイプ 2.54 mmピッチ (サンハヤト社)

- 端子
- BNC コネクタ
- アルミケース (50×80×30 mm)

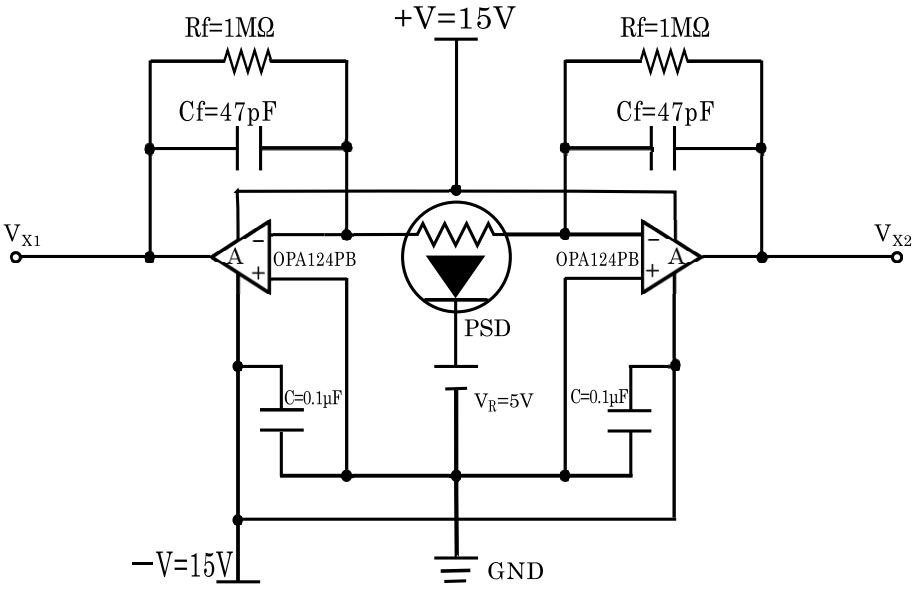

図 2.7　PSD 回路図

2.4.2　PSD の分解能

実際に作製した PSD の位置分解能を以下の方法で評価した。図 2.8 のように PSD, レーザーポインタ, ミラーを配置した。ミラーはマイクロメータの上に設置してあり、前後にマイクロメートルオーダーで動かすことができる。それぞれの装置の距離からマイクロメータを 2.5 μm 動かすと、輝点は約 0.6 μm 移動することになる。

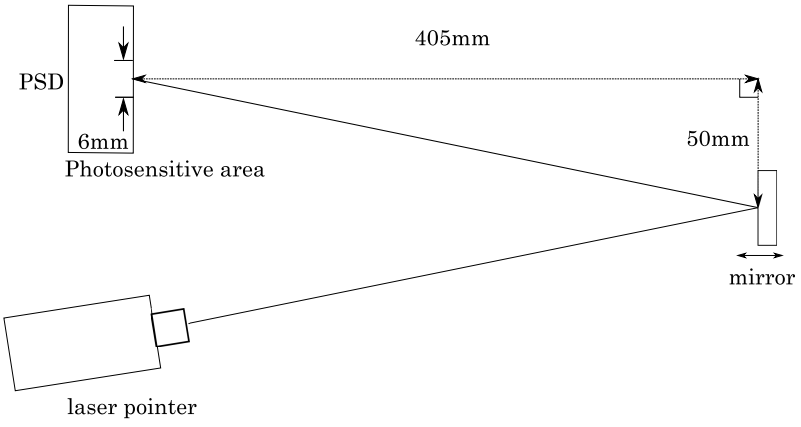

図 2.8　PSD 分解能測定の配置図

測定から横軸と縦軸をそれぞれマイクロメータの変位、輝点の変位として図 2.9 が得られた。赤線はマイクロメータの変位と輝点の変位の幾何学的な対応関係である。青マーカーが実際に PSD から読み取った値であるが、これは 1 秒間にサンプル数を 1000 個とり平均をとったものを 12 点とり、さらにその平均を 1 点としてプロットした。エラーバーは 12 回の測定値の標準偏差、マイクロメータを手動で動かしたことによる誤差を考慮したものである。正確な移動距離を測定するためには校正を行う必要があるが、サブマイクロオーダーの位置変化を読みとることができることを確認した。

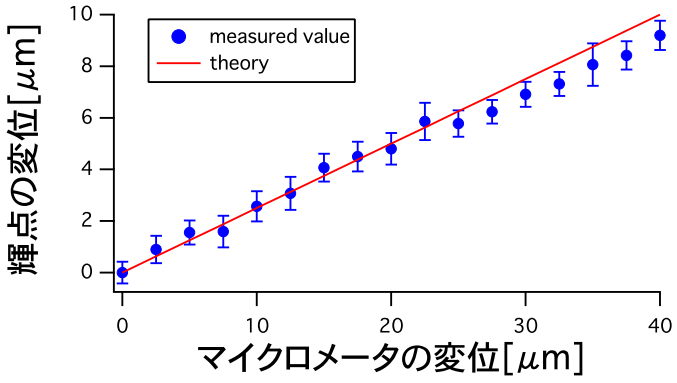

図 2.9　輝点の移動量と PSD の測定値

もう 1 つ PSD の動作確認として島津理化の万有引力実験器を用いてキャベンディッシュの実験を行った [9]。この実験は万有引力を利用したねじれ振動の観測から万有引力定数を見積もる実験である。だが、わずかなねじれ振動という現象を観測するという点で本実験と共通していて、類似した信号が得られることが想定された。そこで PSD の性能を確認することも含めて実験を行い役立てた。PSD によって観測されたねじれ減衰振動とその周波数成分を図 2.10, 2.11 に示す。図 2.10 からはつり合いの位置から外力 (万有引力) によって振動が引き起こされ減衰していき新たなつり合いの位置に達することがわかる。これは本実験では、ある円偏光を入射し続けセルが安定した状態で、逆回りの円偏光を入射したときの時間経過の様子を観測することに対応する。振幅 · 周期は異なってくるだろうが、本実験においてもこのような結果が得られるものと推定する。

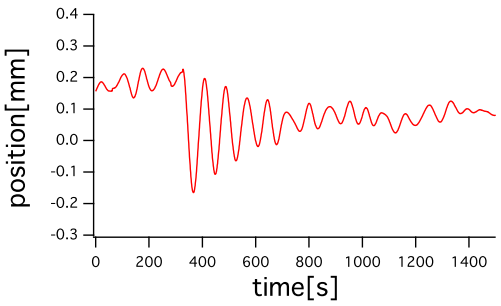

図 2.10　周期測定

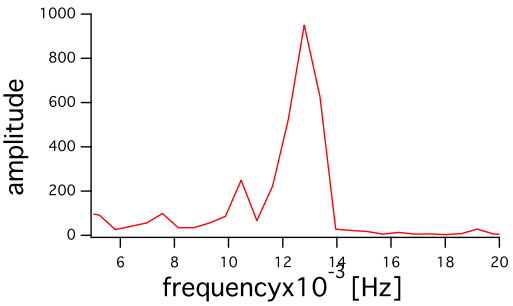

図 2.11　振動の周波数成分

2.5　ねじり振り子

2.5.1　弾性体のねじれ

使用するレーザーのパワーや著者が作製した PSD の位置分解能から求められるねじり振り子の感度を決定した。著者がそろえた装置のセットアップではセルが受け取るトルクは最大で $\tau = 4.1 \times 10^{-16}$ N·m である。つまりこれ以下の力で検出限界だけねじることができる振り子の作製が絶対条件となる。主に感度を決めるのが振り子のワイヤーである。ワイヤーの選定方法は円柱状の弾性体のねじれを考えて決定した [10]。半径 R、長さ L の弾性体の円柱の一端を固定し他端を角度 Φ だけねじるのに必要なトルクは以下のようになる。

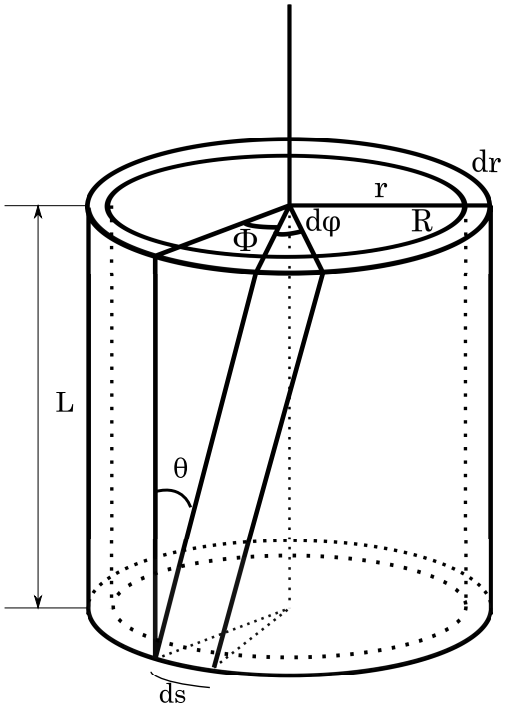

図 2.12　弾性体のねじれ

円柱内部の半径 $r \sim r + dr$ の薄い円筒状の殻を切り出して考えていく。さらに、殻の周に沿う微小な長さ $ds(= rd\phi)$ の部分を考えると、辺の長さが $dr,\ ds,\ L$ の直方体で近似することができる。円筒状の殻がねじれるときには、この直方体の上面に周方向の力 dF がはたらいた結果、直方体が鉛直方向に対して角度 θ だけ傾いたと考えられる。よって、ねじれ角 Φ と直方体のひしゃげた角度 θ の間には以下の関係が成り立つ。

$$L\theta = r\Phi \tag{2.15}$$

ずれ弾性率を G とすれば、このずれを起こすために必要な接線応力 $f = G\theta$ であり、直方体の上面全体が受けている接線方向の力 dF は

$$dF = fdrds = G\theta = \frac{G\Phi r}{L}drds = \frac{G\Phi r^2}{L}drd\phi \tag{2.16}$$

となる。この力が円筒の中心軸のまわりに作り出す力のモーメント $d\tau$ は

$$d\tau = r \times dF = \frac{G\Phi r^3}{L}drd\phi \tag{2.17}$$

であるから、円柱を角度 Φ だけねじるのに必要な力のモーメント (トルク)τ が以下のように得られる。

$$\tau = \int_{(\text{円柱断面})} d\tau = \int_0^R dr \int_0^2 \pi\frac{G\Phi r^3}{L}d\phi = \frac{2\pi G\Phi}{L}\int_0^R r^3 dr = \frac{\pi G\Phi R^4}{2L} \tag{2.18}$$

式 (2.18) の最右辺からねじるのに必要なトルクはねじる弾性体の半径の 4 乗に比例することがわかる。振り子のワイヤーに使用したタングステンはずれ弾性率 G が他の物質と比較して大きかったが、強度も高

く半径をより小さくすることが可能であったことから選定した。他にも高強度繊維、カーボンナノチューブ、ガラスファイバー、クモの糸などの候補があった。タングステン、ガラスファイバー、クモの糸については以下に示すねじれ振動測定を行った。ガラスファイバーとクモの糸は強度があり、ずれ弾性率はタングステンよりも小さかった。だが、得られると予想されるトルクで検出限界以上回せる径のワイヤーを入手することが難しく、実験への使用には至らなかった。

2.5.2 ねじれ振動

実際に使用するタングステン線のずれ弾性率 G をねじれ振動の周期を測定することによって決定した。回転の慣性モーメント $I(= Ma^2/2)$ の剛体が長さ L、半径 R の細い弾性体の糸に吊るされ、糸を軸として回転するねじり振り子を角度 Φ_0 だけねじって静かに放すと糸の弾性による復元力のために剛体は回転振動をする。これがねじれ振動であり、剛体の回転運動の方程式は、一般にオイラーの方程式で与えられ、

$$I\frac{d\omega}{dt} = N \tag{2.19}$$

が成り立つ。ただし、ω は回転の角速度、N は力のモーメントである。ω, N は回転軸に平行な成分だけを考えればよく

$$I\frac{d\Phi^2}{dt^2} = -\frac{\pi G R^4}{2L}\Phi \tag{2.20}$$

$$\frac{d\Phi^2}{dt^2} = -\Omega^2\Phi,\ (\Omega = \sqrt{\frac{\pi G R^4}{2IL}}) \tag{2.21}$$

ただし、Φ はねじれ角度で、$\omega = d\Phi/dt$ である。$t = 0$ で $\Phi = \Phi_0$, $d\Phi/dt = 0$ として (2.6) 式を解けば、

$$\Phi = \Phi_0 \cos\Omega t,\ \text{周期}\quad T = \frac{2\pi}{\Omega} = \sqrt{\frac{8\pi IL}{GR^4}} \tag{2.22}$$

となる。

測定方法を以下に記す。円柱状のおもりを接着したねじり振り子吊り下げてしばらく安定させたあと、下からラボジャッキによって支える。目視で $\Phi_0 \leq 30^\circ$ となるようにねじって、ジャッキを引き下げてねじれ振動をはじめる。しばらく時間をおいてから、ねじれきって逆方向に回転を始める瞬間を目安に目視よって周期測定を行った。ワイヤーやおもりの条件によって異なるが、誤差を少なくするために何周期分かをまとめて時間を測定して、それを周期の回数で割って 1 周期 T とした。表 2.1, 図 2.13 に測定したずれ弾性率 G と各条件について示す。

文献値でタングステンのずれ弾性率は $G = 1.66 \times 10^{11}$ Pa である [11]。これと比較するとワイヤー半径が 25 μm のときずれ弾性率はほどほどの一致を示した。だが、ワイヤー径が細くなり、慣性モーメントが小さくなっていくと 1 桁ないし 2 桁程度大きい値となった。図 2.13 はワイヤー半径が 25 μm のときのおもりの慣性モーメントとずれ弾性率の関係を示したものであるが、線形性が見受けられた。ずれ弾性率はその物質の固有の定数であり、ワイヤー径、ワイヤー長、おもりの慣性モーメントなどには依存しな

いはずである。しかし、この測定ではこれらの値の違いでずれ弾性率が変わるという結果になってしまった。

表 2.1　ねじれ振動によるずれ弾性率の測定

ワイヤー		おもり				
半径 R[μm]	長さ L[m]	質量 M[g]	半径 a[mm]	慣性モーメント I[kg·m^2]	周期 T[s]	ずれ弾性率 G[Pa]
25	0.12	23.3	7	5.7×10^{-7}	5.0	1.8×10^{11}
		46.6		1.1×10^{-6}	4.4	1.6×10^{11}
		69.9		1.7×10^{-6}	10.8	1.2×10^{11}
		93.2		2.3×10^{-6}	14.3	8.6×10^{10}
10	1	11.76	3	5.3×10^{-8}	9.7	1.4×10^{12}
		17.57		7.9×10^{-8}	11.2	1.6×10^{12}
		46.46		2.1×10^{-7}	48.0	2.3×10^{11}
3.3	0.07	5.8	5.8	9.8×10^{-8}	5.6	1.2×10^{13}
		11.76		2.0×10^{-7}	9.0	9.7×10^{12}
	1	5.8	3	2.6×10^{-8}	34.0	4.8×10^{12}

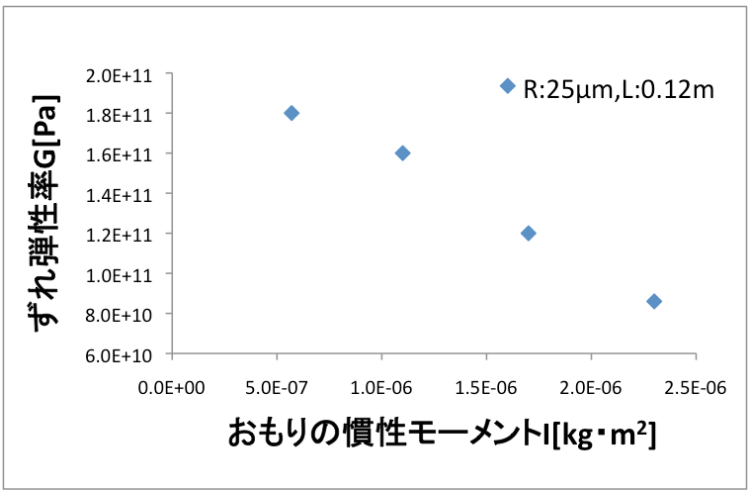

図 2.13　慣性モーメントとずれ弾性率の関係

今回の回転実験は回転を確認するという点においてだけ言えば測定限界以上回ればよいので、測定したずれ弾性率の大きさからワイヤーのセットアップを決定した。おもりの慣性モーメントが 4.8×10^{12} であり、タングステンワイヤーの半径と長さをそれぞれ R=3.3 μm, 1 m としたときのずれ弾性率は $G = 4.8 \times 10^{12}$ Pa であった。これから測定限界 ($d\Phi \geq 1 \times 10^{-7}$ rad) だけねじるのに必要なトルクは 8.9×10^{-17} N·m となった。これはセルが最大で受け取ることができるトルク (4.1×10^{-16} N·m) よりも小さい値である。ただし、ねじれ振動に使用したおもりと回転実験に使用したセルの慣性モーメントの違いは考慮しなかった。実際のねじれ振り子に使用したワイヤーの半径と長さはそれぞれ R=3.3 μm, 1.17 m

であった。このずれ弾性率の測定は特に容器に入れたり、真空に引いたりすることなく行った。あとで述べることになるが、この測定環境は決していいとは言えないものであり、おもりの慣性モーメントで測定結果が左右される可能性があった。

2.5.3 ワイヤーとセルの接続方法

ワイヤーが極めて細かったことから、ワイヤーが破断するおそれがあった。そこでワイヤーが切れたときに交換できるように以下に示すような方法をとった。最初にセルの上面にポンプ光反射用ミラーを反射面がセル側にくるようにして接着した。次にプローブ光反射用ミラー (正方形ミラー) を反射面が直立になるようにしてポンプ光反射用ミラー (円形ミラー) と接着した。さらに検出光反射用ミラーの上にプリント基板を接着し、ワイヤーをその基板とはんだづけすることでワイヤーとセルをつなぎねじり振り子とした。なお、接着剤には Torr Seal(真空用接着材) を用いた (図 2.15)。

ここで円形ミラーについて説明しておく。セルへの取り付け理由としては 2 つある。1 つは反射光のパワーからポンプ光が十分吸収されているかを確認するためである。これによってヒーターの温度調整を行う。もう 1 つは式 (2.9) からセルを長くすることによって吸収量を増すことができるからである。反射することによって吸収量は倍となる。

使用部品

- ルビジウム蒸気セル
  - 直径 ϕ: 10 mm
  - 高さ h: 31 mm
  - 質量 M: 2.25 g
- タングステン線 (ダイレクトマテリアル)
  - 直径 ϕ: 6.6 μm
  - ワイヤー長 L: 1165 $\pm$10 mm
  - W 純分: 99.95% 以上
  - Fe, Mo, 不揮発分: 0.05% 以下
- 平面ミラー (Edmund)
  - 円形ミラー (ポンプ光反射用)
    - 直径 ϕ: 6.3 mm
    - 板厚: 0.5 mm
    - 質量: 0.04 g
  - 正方形ミラー (プローブ光反射用)
    - 外形: 9×9 mm
    - 板厚: 1 mm
    - 質量: 0.20 g
  - 基板: フロートガラス

  - 基板面精度 4 ∼ 6λ
  - 反射率: 90% 以上 (400-650 nm)
- Torr Seal
  - 耐熱温度: 120 ℃
  - 可能真空度: 10^{-9} Pa

図 2.14　ねじり振り子

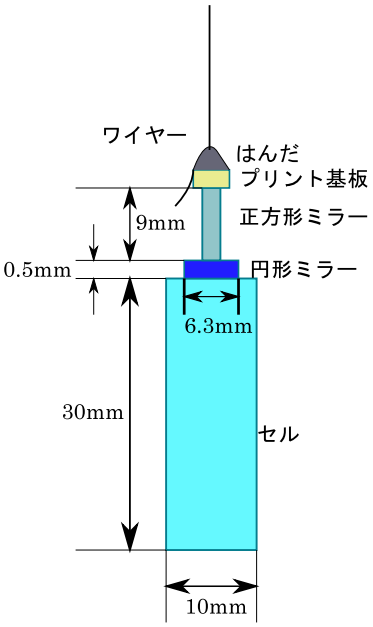

図 2.15　振り子の模式図

2.6　その他使用装置

2.6.1　回転導入

図 2.2 に触れた際に述べたが、真空チェンバーのポートの位置からレーザーポインタと振り子に接着してあるミラー、PSD のなす角はおおまかに π/8 rad でなくてはならない。しかし安定したセルがそのような角を成すように振り子を吊るすことは困難である。そこでワイヤー上端はプリント基板を介して回転導入 (図 2.3 右側) と接続してワイヤーを軸とする回転に対しての位置を調整できるようにした。

2.6.2　偏極磁場用コイル

図 2.3 より装置のまわりには 3 次元的にコイルを設置した。これはスピン偏極した原子に横磁場がかかると偏極が崩れてしまうためである。このコイルに電流を流して主に地磁気であるが、外部磁場を打ち消した上でセルに鉛直方向に 1 G 程度の磁場がかかるようにした。

2.6.3　ヒーター

チェンバーの外側には電熱ヒーターが巻いてあり温度調整ができるようにした。これは必要に応じて円偏光の吸収量を変えられるようにするためである。熱電対をチェンバーとヒーターの間に挟み込みアルミホイルで覆って温度の計測をした。セルの温度を測定しているわけではないので温度制御としては不確かさはかなり大きいと言える。

2.6.4　CCD カメラ

2.5.3 で述べたが、セル上面には円偏光反射用にミラーが接着してある。このミラーによって反射された光をみて入射を確認しようとした。また、この反射光のパワーから吸収量を確認し、温度を調節しようとした。だが、実際には反射光を確認するのが困難であったのでビューポートの正面に CCD カメラを設置した。CCD カメラでセル内のルビジウム原子の発光を見ることによって、セル内にポンプ光が入射されているかを確認した。また、入射した光がどのくらい吸収されているかも確認した。

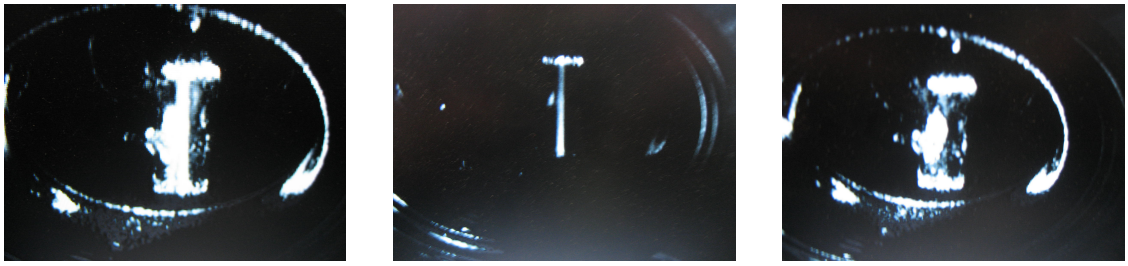

図 2.16　Rb の発光線

図 2.16 はそれぞれ条件を変えていったときのセル内の様子を CCD カメラで観測したものである。図 2.16 の左側が、ヒーターの温度が 60 ℃であるとき、ルビジウム原子に共鳴であるポンプ光 (50 mW) がセル内に入射されている様子である。中央の図はポンプ光は同じ条件でヒーターの温度を 120 ℃にしたときの様子である。右側はルビジウム原子に共鳴でない光をセル内に入射したときの様子である (ヒーターの温度: 60 ℃)。左側 (60 ℃) と中央 (120 ℃) の図にはポンプ光によってルビジウム原子が発光し、発光線が現れている。60 ℃のときはルビジウム原子の発光ははっきり見えている。つまり、ルビジウム原子は窒素ガスによって完全には無輻射緩和していない。120 ℃まで上げると、発光はかなり抑えられていて上にいくほど弱くなっている。このことからポンプ光は十分に吸収されていることがわかる。そのためセルにあたっておきる散乱もかなり抑えられている。右側の図では非共鳴光を入射していることから発光線は見られない。セル中央の光っている部分はルビジウム原子が発光しているのではなく枝管で散乱が起きていることによるものである。

これらの様子からセルにポンプ光が入射できているかを判断した。CCD カメラによる確認ではヒーターの温度を 130 ℃まで上げると 420 mW 程度のパワーをもつ光はセル内で全て吸収された。

第 3 章

実験

3.1 回転の観測

3.1.1 観測方法

実験結果を示していく前に、回転の観測方法について述べる。先に記述したとおり極わずかな力で回転を観測するためにねじり振り子には高い感度が要求された。しかし、その感度の良さゆえに他の要因による力も回転に大きく寄与してしまい、PSD(受光面長 L_X: 6 mm) が使用できる範囲以上の回転が起きた。そのため目視による観測をおこなった。

3.1.2 排除すべき回転運動

本実験において排除すべき回転はさまざま観測された。ビューポートが取り付けられておらず、装置内と外がつながっていたときは空気の出入り (対流) があった。そのため、振り子を安定させることは難しく自然に起こるねじれ振動が目立っていた。この振動には一般的な振り子に見られる等時性があまりなく周期はまちまちであった。系を閉じ真空に引いた (2.4×10^2 Pa 程度) ところ、その前まで起きていた振動はかなり改善された。それでも完全に静止しているわけではなかった。時間が経過して真空容器内の真空度が悪くなるとポンプ光を入射したときにおこる回転の振幅は大きくなり、安定するまでに時間がかかった。真空に引いておいた場合、ポンプ光の吸収量を増やすために温度を上げたとき、ねじれ振動が大きくなるというようなことはなかった。

3.1.3 回転の方向、大きさ

ポンプ光をセルに入射したことによる回転は観測できた。ポンプ光を入射してしばらくするとセルはゆっくり回転をはじめ、徐々に加速していった。その後、回転の速度は落ちていき、ある点で静止して逆方向に回転をはじめた。そしてねじれ振動を繰り返して、振動は減衰していき初期状態の位置ではない新たな位置で安定していった。

回転が発生する条件は、ある程度のパワーをもった光 (420 mW, 780 nm) を入射することだけであった。原理で示したような円偏光の左回りか右回りかで回転方向が反転するような現象は見られなかった。

また直線偏光においても回転が起こり、偏光の方向 · 種類に関係なく同様の回転が観測された。そればかりか、ルビジウム原子に共鳴でない光 (780.208 nm, 780.353 nm) によっても回転が観測された。ただし、共鳴光 (780.246 nm) を入射したときの回転の振幅は非共鳴光を入射したときより大きかった。

今回の観測は目視で行い、ワイヤーのずれ弾性率の不確かさも大きいことから回転に対してあまり定量的に述べることができない。だが、2.4×10^2 Pa の真空度において共鳴光を入射したとき輝点は $\pi/4$ rad 程度移動した。このことから、セル自体は $\pi/8$ rad 程度回転していたことになる。よって式 (2.16) から使用したタングステンワイヤーのずれ弾性率を $G = 4.8 \times 10^{12}$ Pa とすれば、セルが受け取ったトルクは $10^{-10\sim-11}$ N·m となった。

第 4 章

考察

本章では得られたデータに対しての議論を行う。セルの回転方向は偏光の方向 · 種類によらずレーザーの入射位置によって変化した。また、回転角は予想していた (10^{-7} rad) ものよりかなり大きく、$\pi/8$ rad 程度も回転した。ずれ弾性率の測定値が大きい可能性はあるが、入射光のパワーは見積もっていた値の半分以下であることを考えると、観測された回転というのは非常に大きいものであったと言える。これらのことから、観測された回転の主たる原因は原子とセルを相互作用させ、スピン角運動量を古典的角運動量に変換させることによる回転ではなかったと判断した。

装置内が外とつながっていたとき、振り子にはねじれ振動が起きていて時間をおいても安定しなかった。また振り子の周期性が見られなかった。だが真空に引くとそれらは改善された。このことから対流 (セル外) というものがねじれ振動に大きく影響を与えてることが伺えた。また以下に示す考察から、観測されたセルの回転は主にセル内の窒素ガスの対流が主な原因だったと考える。主に窒素ガスとしたのは、窒素の圧力がルビジウムの圧力と比べてかなり大きいからである。対流は熱的に引き起こされるものである。ポンプ光を入射することで回転が起こることから、熱の供給源はポンプ光の光エネルギーであると考えられる。熱の発生箇所はいくつかある。1 つはポンプ光反射用ミラーである。使用したミラーの反射率が決して高くない可能性がある。先に記述したが、反射率が 90% 以上となる波長域は 400-650 nm である。照射したポンプ光は約 780 nm であり、10% 程度はミラーに吸収されてしまい熱が発生する。また、CCD カメラからも反射は確認できなかった。2 つ目はセルである。理由としてはミラーと同じようなことが挙げられる。セルの材質はガラス (パイレックス) であるが、ガラスは可視域に対しては透明であり、赤外域および紫外域に吸収をもつ。波長 780 nm はかなり可視光域に近くさほど吸収は起きていないはずだが、この 2 つの原因によってポンプ光の波長に関わらずセルの回転が起きたと考える。3 つ目はセル内の窒素ガス自体である。共鳴光の場合、原理で説明したように窒素は無輻射緩和をおこすので、系内で角運動量も保存されるとともにエネルギーも保存される。ここで、光エネルギーが熱エネルギーへと変換されてしまい窒素ガスの温度が上昇してしまった可能性がある。これが共鳴光が非共鳴光より振幅が大きくなった原因である。熱の発生は以上の理由が考えられ、それによってセル内の窒素が対流する。

実際のセル内の対流がどのように起き、流れを形成しているのかという詳しいメカニズムはわからない。だが、対流が回転方向の力を与えてしまうのは実験システムにおいて対称性が悪いことが原因として挙げられる。円筒形セルではあるが、枝管がついていてセルが小さいことから無視できるような大きさではない。また、ミラーの接着やワイヤーのはんだづけは手作業であり、取り扱っているものが微小であっ

た。このことから正確にセル上面がワイヤーに対して垂直になるように吊れてはいなかった。わずかではあるが目視でわかる程度に傾きがあった。温度が高い気体は上方に移動していくことから対流に偏りが生じる。もし完全な円筒形セルで、軸上にワイヤーを接続できている状態でさらに軸上にポンプ光を入射していたらセル内で対流が起きていても回転の振幅は減らすことができた可能性がある。ここまではセル内の対流に焦点を絞ってきたが、セル外にもわずかながら対流が発生している可能性があり今回の実験ではその影響は観られなかったが、さらに高真空にする必要性が出てくることも考えられる。

スピン角運動量の移行による回転を観測するためにはそれによって得られるトルクを考慮すると、以上の理由で得られるトルクを 6~7 桁小さくすることが求められる。

第 5 章

まとめと展望

5.1 本論文のまとめ

本実験の目的は原子のスピン角運動量をマクロな物体であるセルに移しセルを回転させることであった。パワーのある光 (420 mW, 780 nm) の入射によってセルは回転し出した。この回転の回転角は $\pi/8$ rad 程度と目視でわかるほどであり、予想 (10^{-7} rad) よりも大きいものであった。回転しはじめる方向と偏光には関係性はなかった。だが、ポンプ光の入射位置を変えると回転方向が反転することがあった。このことから観測した回転はスピン角運動量の移行によって発生したものではないと判断した。

実験システムには熱が発生してしまう機構があり、光エネルギーが熱エネルギーに変換されてしまっている。この熱によってセル内で対流が起き、セルが回転したと考えられる。熱エネルギーを発生させる機構は 3 つほど考えられミラー、セル、セル内の窒素であるが、対流を引き起こしているのは主に窒素である。ポンプ光の入射によってミラーとセルが温まり対流が起きセルは回転し、さらに共鳴光であれば窒素自体も温度が上がり振幅が大きくなる。対流によりセルが回転するのはねじり振り子の対称性の悪さも影響していると考えられる。

振り子のまわりを真空に引いた状態で、ヒーターの温度を上げても振り子が目視でわかるほどに回転し出すことはなかった。だが、真空度は 2.4×10^2 Pa であり決して高真空というものではなかった。このことからセルのまわりの対流も回転に寄与していた可能性がある。今回のセルの回転は Beth の実験や Einstein - de Haas 効果では起こり得なかったセル内の対流が原因となったが、セルが受け取ったトルクは 10^{-10}〜$^{-11}$ N·m であり、目的の回転を観測するためにはこのトルクをスピン角運動量の移行によって得られるトルクつまり、10^{-16} N·m オーダーまで小さくする必要がある。

5.2 今後の展望

セル内の熱的に発生した対流によってセルが回転することを決定付けるために、今回の実験システムのままでポンプ光の波長帯域だけを変えて、回転の振幅などに変化が生じるか観測することが挙げられる。セルやミラーの吸収が大きく (小さく) なる波長帯域では振幅が大きく (小さく) なるはずである。具体的にはミラーが十分に性能を発揮できて、反射率が 90% を超える可視光域、また今回同様ミラーの反射率が悪くなる紫外域での観測をして、実験結果を比較していく。

目的である角運動量の移行による回転を観測するためには主にセルの内部も含めねじり振り子を改良することが必要である。観測された回転の主な原因がセル内の対流としていることから、セル内のクエンチングガスである窒素の圧力 (今回窒素の圧力は 50 Torr 以上) をなくすことが有効な手段であると考えられる。なぜなら実験システムで熱を発生する部分があっても、そもそも対流が起こらなくなるからである。また窒素をなくすことで実験システムがシンプルになりどのように原子のスピン角運動量が移行していくかという解析がしやすくなる。

ワイヤーのセットアップを決めたねじれ振動の周期測定は、対流がある状態では振り子のおもりのおもさや形状が周期に大きく影響を与える可能性が高く、ずれ弾性率を適切に見積もれていない。まわりを真空に引いた状態で、目視ではなく PSD などを用いてねじれ振動によるワイヤーのずれ弾性率の再測定を行い厳密にワイヤー径、ワイヤー長について見積もり、観測される回転について厳密に測定できるようにする。

これらの改善を行い再度同様の実験をおこないセルの回転について評価していきたい。

参考文献

[1] H. Haken and H. C. Wolf, “The Physics of Atoms andQuanta 7th Edition”, Springer P.189 (2005)

[2] Richard A. Beth, “Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light”, Physical Review Vol. 50 (1936)

[3] John D. Feichtner, “Lifetime of the First Excited Atomic States of Rb ”, Physical Review Vol. 164 (1967)

[4] William Happer, “Optically Pumped Atoms”, WILEY-VCH (2010)

[5] M. V. Romalis, “Pressure broadening of Rb D_1 and D_2 linesby^{3}He, ^{4}He, N_2 and Xe: Line cores and near wings”, Physical Review A Vol. 56 (1997)

[6] 畠山 温, “飽和ヘリウムバッファーガスを封入した低温アルカリ原子気体セルの実現と光ポンピング”, 博士論文 (2001)

[7] Matthew D. Rotondaro and Glen P. Perram, “Collisional broadening and shift of the rubidium D_1 and D_2lines ($5^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{1/2}$, $5^2P_{3/2}$) by rare cases, H_2, D_2, N_2, CH_4 and CF_4”, J. Quant. Spctrosc. Radiat. Tranfer Vol. 57 (1997)

[8] 浜松ホトニクス, “PSD 技術資料”, http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/psd_techinfo.pdf

[9] 株式会社島津理科, “万有引力実験器取扱説明書”

[10] 佐野 理, “連続体の力学”, 裳華房 (2000)

[11] 株式会社ライズリック, www.riseric.co.jp

[12] J. J. Sakurai, “現代の量子力学 上”, 桜井明夫訳, 吉岡書店 (1989)

謝辞

今回、本研究が量子力学と古典力学にまたがった境界領域であったこともあり、さまざまな知識や知恵を学ぶことが出来ました。まず、実験アイディアや装置の扱いを丁寧に御教授下さった畠山温准教授に深く感謝致します。来年度からは修士生として当研究室に所属することになりますが、引き続き改めてよろしくお願い致します。また、その他畠山研究室の皆様に多くの助力を頂き、お陰様で本卒業論文を執筆することが叶いました。畠山准教授を含め、畠山研究室の皆様に改めて厚く御礼申し上げる次第です。1年間ありがとうございました。

掲載データとファイルの対応

- 図 2.5、図 2.6 ルビジウム蒸気セルの吸収スペクトル
  ログノート：No.35 1/9
  ファイル：Experiments\ セル \0109 \TEK0004_3.csv, TEK0004_4.csv & rb_spe_3.pxp

- 図 2.9 PSD の分解能評価
  ログノート：No.20 11/26
  ファイル：Experiments\PSD\psd_1125.xlsx & psd_0108.pxp

- 図 2.10、図 2.11 キャベンディッシュの実験
  ログノート：No.31 12/9
  ファイル：Experiments\cavendish\cave_1209_4.csv & cave1210.pxp

- 表 2.1、図 2.13 ずれ弾性率の評価
  ログノート：No.5∼9 9/5, 16, 18, 22
  ファイル：Experiments\fiber\ ねじれ振動周期.xlsx